Шестиногая капсула C2 v2 — настольная действующая модель 1:40

12 SG90 на ноги + 1 SG90 на трап · ESP32 + PCA9685 · ноги — развязанный пантограф λ = 1,5 из пластин Д16Т (ЧПУ) · корпус PETG



1. Итог

Параметр	Значение
Прототип	концепт C2 «капсула v2», `asv/cad/asv_castle_v2.py` (6 ног, пантограф λ = 1,5)
Масштаб	**1:40** (корпус 7,9 × 4,0 × 4,0 м → 198 × 100 × 100 мм)
Выбранный вариант	**C — 12 SG90 (по 2 на ногу: подъём + шаг) + 1 SG90 трапа, всего 13**, драйвер PCA9685
Худший момент (трипод, ×1,3)	подъём 0,253 кг·см, шаг 0,304 кг·см
Запас к 0,7 кг·см (длительно)	**подъём 2,76, шаг 2,31 — минимум 2,31 ≥ 2**
Запас к 1,8 кг·см (стоп)	≥ 5,93
Масса	492,3 г по объёмам B-rep FreeCAD (+5 % → расчётная 516,9 г)
Шаг / подъём стопы / скорость	12,0 мм / 6,0 мм / ≈ 10,0 мм/с (полуцикл 1,2 с)
Клиренс шасси	22,5 мм; «сесть» — корпус ниже на 6 мм
Питание	2S Li-ion 2 × 18350 IMR (7,92 Вт·ч), BEC 5 В / 5,5 А; ток ср. 2,35 А, пик 4,81 А; ≈ 29 мин
Управление	ESP32, Wi-Fi AP «Hexapod-C2», веб-пульт, калибровка в NVS

2. Выбор варианта (запас ≥ 2 к 0,7 кг·см)

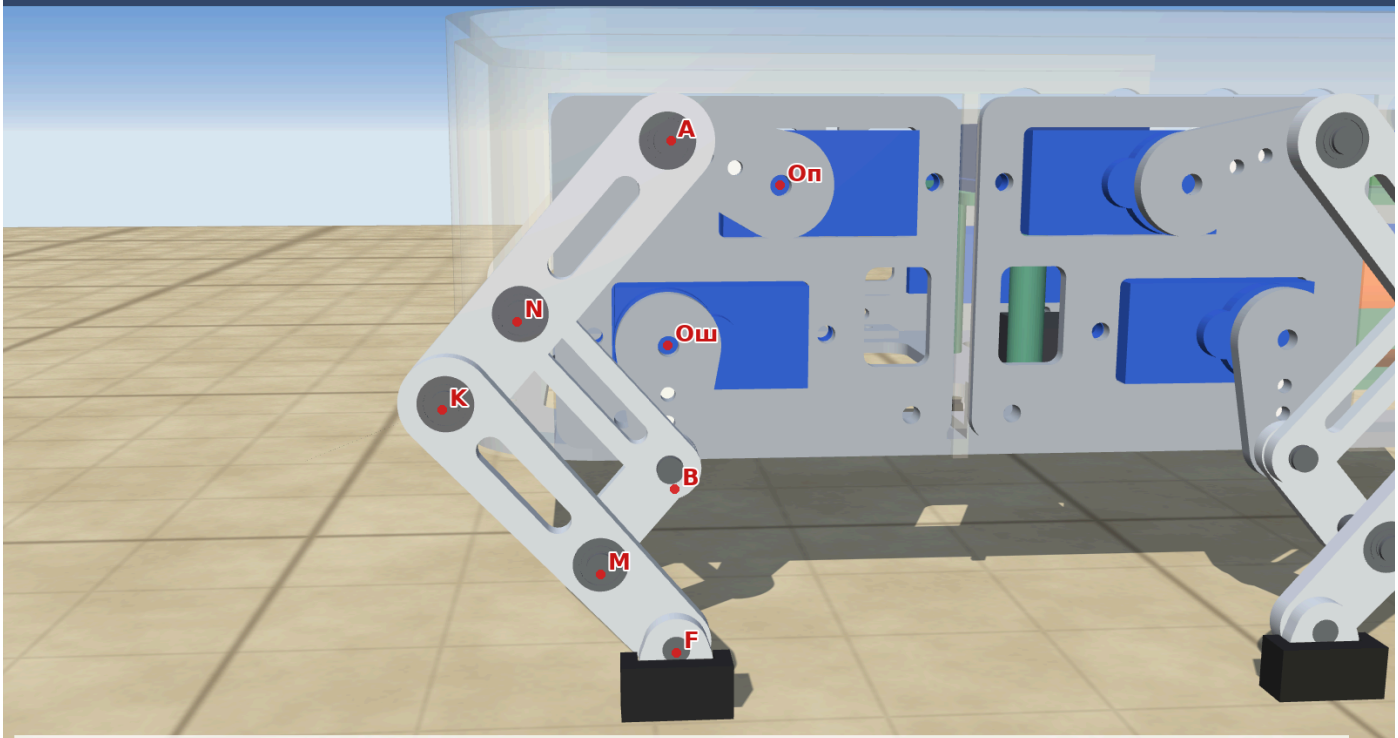
Прежняя схема с 12 SG90 и прямым приводом требовала 1,66 кг·см (запас 0,42). Сравнение для этой модели (масса 516,9 г, одиночная средняя нога трипода несёт W/2, динамика ×1,3, горизонтальная сила ±0,1·Fz, КПД шарниров 0,9):

Вар.	Схема	SG90	Треб. момент, кг·см	Запас к 0,7	≥ 2?
A	Прямой привод тазобедренный/коленный (12 SG90, «паук», как прежняя схема)	12	1,493	0,47	нет
B	Трипод-связка: 2 SG90 на подъём + 2 на шаг (три ноги на одну серву тягами)	5	0,634	1,10	нет
C	ВЫБРАН: развязанный пантограф λ=1,5 (как C2 v2), 2 SG90 на ногу через качалки-плечи R14/R13 + PCA9685	13	0,304	2,30	да

Почему C проходит. В пантографе стопа F = A + λ(B − A). Серво подъёма ведёт точку A по дуге плеча 14 мм, серво шага — точку B по дуге плеча 13 мм. Подъём и шаг развязаны: вертикальная сила стопы даёт на валу подъёма только Fz·(λ − 1)·RA·cos φ (≈ 0,5 × 14 мм), а на валу шага — Fz·λ·RB·sin ψ, то есть ∝ выносу стопы. Поэтому длина шага ограничена (±6 мм, 12 мм = 480 мм натуры при 600 мм у прототипа), зато оба запаса > 2. Плечи короткие, рабочие углы φ ≈ ±30°, ψ ≈ ±20° — серво работает у «мёртвой точки» и под нагрузкой не уходит. Лёгкость: шасси и звенья из Д16Т 2–2,5 мм с облегчающими окнами, корпус 1 мм PETG, АКБ 18350.

3. Кинематика ноги

Нога: развязанный пантограф λ=1,5 на двух SG90



Оп — серво подъёма (плечо 14 мм) ведёт A; Ош — серво шага (плечо 13 мм) ведёт B; F = A + 1,5·(B − A)
AK = KF = 36 мм; тяги NB 24, BM 12; MR63ZZ в A, N, K, M, F; штифты Ø3 h6 + DIN 6799

Элемент	Значение (система модуля: x вдоль корпуса, z вверх, мм)
λ, бедро AK, голень KF	1,5; 36; 36 (AN = 24, NK = 12; KM = 24, MF = 12)

Элемент	Значение (система модуля: x вдоль корпуса, z вверх, мм)
Серво подъёма Оп / плечо	(-12,65; 56,0) / RA = 14, A = Оп + 14 (cos φ, sin φ)
Серво шага Ош / плечо	(0; 38) / RB = 13, B = Ош + 13 (sin ψ, −cos ψ)
Тяги	N–B 24 мм, B–M 12 мм (параллелограмм пантографа)
Стопа	ось F на z = 7 в опоре, подъём 6 мм; башмак TPU, низ z = 0
Обратная задача	Ньютон по (φ, ψ) для A + 1,5(B − A) = F; одинаково в `cad/hx_params.py` и `firmware/hx_kin.h` (проверено совпадение до 1e-4 рад)
Рабочие углы	φ ≈ −30…+30°, ψ ≈ −19…+19° (ход серво ≤ 60°)

Слои по толщине (у наружу от кронштейна, мм): кронштейн 48–50 · корпус SG90 29,6–52,3 (ушки на внутренней грани) · качалка 54,8–56,3 · плечи 56,3–58,3 · B–M 58,8–60,8 · N–B 61,3–63,3 · бедро AK 63,8–66,3 · голень KF 66,8–69,3 · стопа 69,8–71,8. Между слоями — шайбы PTFE 0,5 мм.

4. Расчёт

4.1 Масса (из объёмов тел FreeCAD × плотность; покупные — паспортные)

Группа	г
SG90 x13	117,0
электроника	70,5
корпус PETG	68,0
шасси Д16Т 2 мм	67,3
звенья ног Д16Т/АД31	46,5
кронштейны Д16Т	40,9
лоток/ложемент PETG	16,2
штифты Ø3 сталь	15,8
провода, разъёмы, крепёж M2	14,0
подшипники MR63ZZ	12,6
уголки АД31	7,2
качалки SG90	6,0
стопорные шайбы DIN 6799	3,1
трап + кронштейн PETG	3,0
втулки/шайбы PTFE	2,2
башмаки TPU	2,0
Итого (CAD)	**492,3**

Центр масс: x = -6,8 мм, z = 44,0 мм.

4.2 Моменты по сервоприводам (худший случай трипода)

Опорный трипод {ПЛ, СП, ЗЛ} статически определим: средняя нога одна на своём борту → W/2; передняя и задняя делят W/2 с учётом центра масс. Момент на валу — по виртуальной работе $\tau = J^{T} \cdot F / \eta$ (якобиан пантографа), перебор по всей опорной фазе u = −6…+6 мм и знаку горизонтальной силы.

Канал	Серво	Fz макс, г	T макс, кг·см	Запас к 0,7	Запас к 1,8
0	ПЛ подъём (lift)	164,1	0,117	**5,98**	15,38

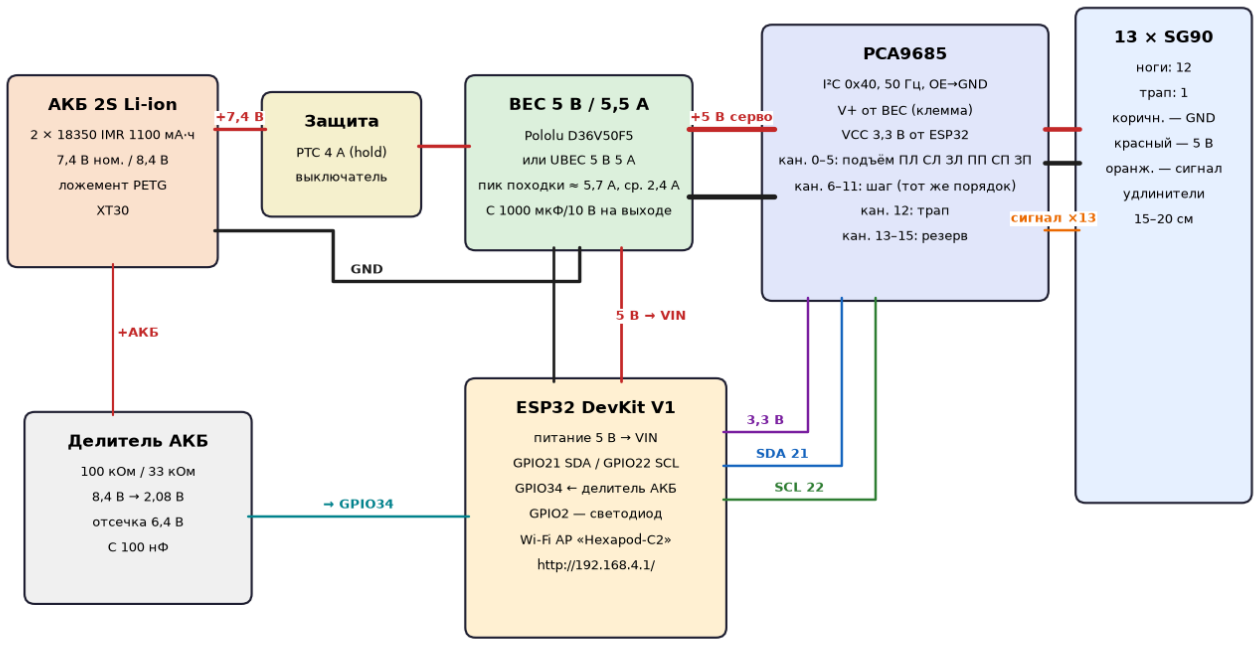
Канал	Серво	Fz макс, г	T макс, кг·см	Запас к 0,7	Запас к 1,8
6	ПЛ шаг (step)	164,1	0,148	**4,73**	12,16
1	СЛ подъём (lift)	336,0	0,253	**2,77**	7,11
7	СЛ шаг (step)	336,0	0,304	**2,30**	5,92
2	ЗЛ подъём (lift)	227,5	0,163	**4,29**	11,04
8	ЗЛ шаг (step)	227,5	0,194	**3,61**	9,28
3	ПП подъём (lift)	164,1	0,117	**5,98**	15,38
9	ПП шаг (step)	164,1	0,148	**4,73**	12,16
4	СП подъём (lift)	336,0	0,253	**2,77**	7,11
10	СП шаг (step)	336,0	0,304	**2,30**	5,92
5	ЗП подъём (lift)	227,5	0,163	**4,29**	11,04
11	ЗП шаг (step)	227,5	0,194	**3,61**	9,28
12	трап	—	0,007 (нажатие 20 г на конец: 0,082)	> 10	> 10

«Сесть/встать» на 6 ногах: подъём ≤ 0,135, шаг ≤ 0,161 кг·см.

4.3 Питание

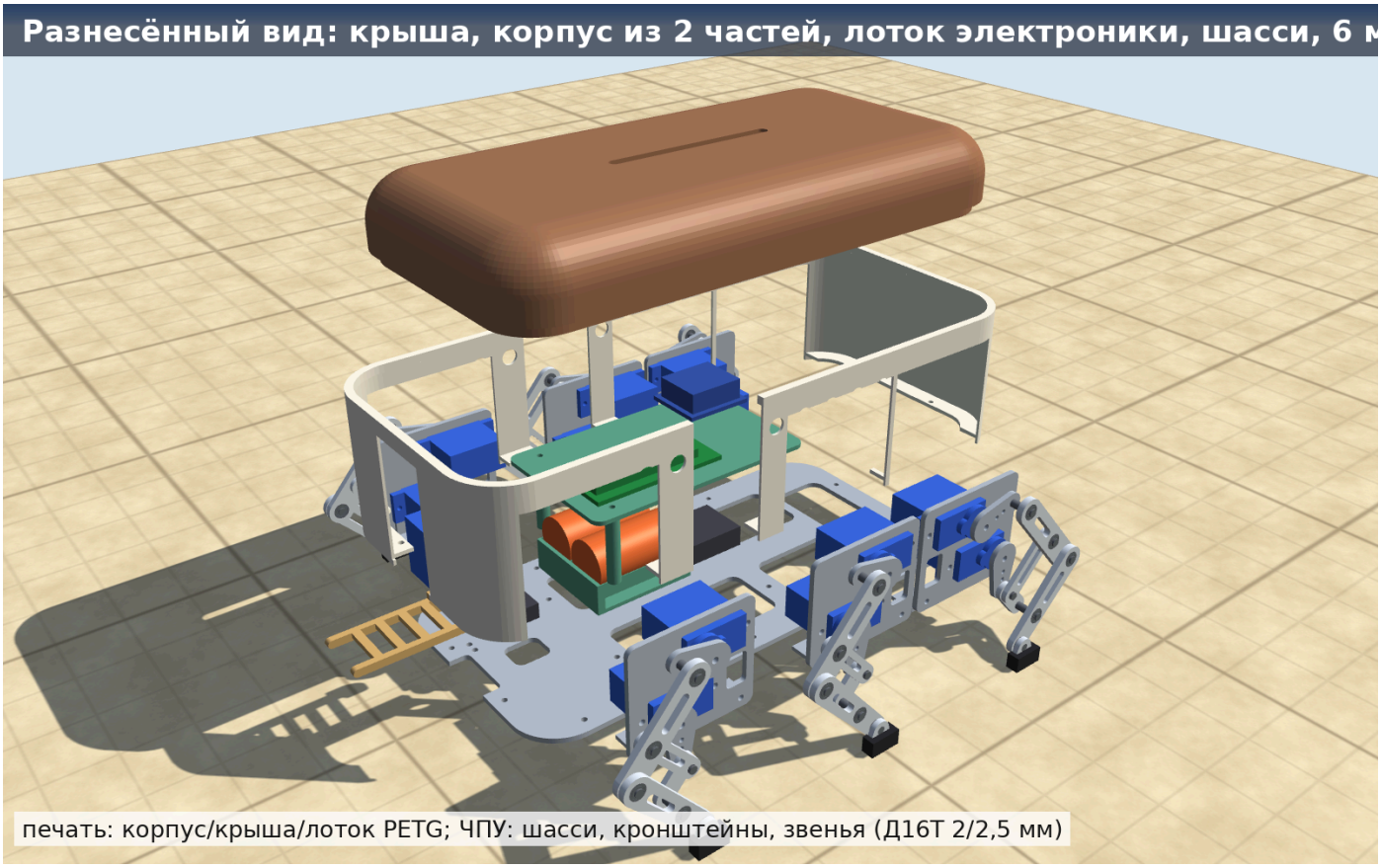
2S Li-ion 18350 IMR 1100 мА·ч (2×21 г), 7,4 В ном., 8,4 В макс.; понижающий 5 В / 5,5 А (Pololu D36V50F5 или UBEC 5 В 5 А), конденсатор 1000 мкФ/10 В на шине сервоприводов. Средний ток походки 2,35 А, пик 4,81 А (6 серв переноса + 6 под нагрузкой). Одновременное включение 12 SG90 дало бы бросок ≈ 7,8 А — прошивка включает каналы по одному через 80 мс. Средняя мощность ≈ 13,1 Вт → ≈ 29 мин на заряд. самовосст. предохранитель PTC 4 А (hold) + выключатель; отсечка 6,4 В в прошивке (делитель 100k/33k на GPIO34).

Схема соединений — шестиногая капсула C2, модель 1:40



Сечения: АКБ→BEC 0,5 мм² (AWG20), BEC→PCA9685 V+ 0,75 мм² (AWG18), сервокабели штатные. Общая земля ESP32/PCA/BEC обязательна. Не питать сервоприводы от 5 В платы ESP32!

5. Конструкция



печать: корпус/крыша/лоток PETG; ЧПУ: шасси, кронштейны, звенья (Д16Т 2/2,5 мм)

- **Шасси** — Д16Т 2 мм, 195 × 96 мм, R18, облегчающие окна, кормовой вырез под трап. Несёт 6 модулей ног, лоток электроники, ложемент АКБ, кронштейн серво трапа и корпус (4 винта М2 через фланец).
- **Модуль ноги** (×6, одинаковый, зеркальный по x/y): кронштейн Д16Т 2 мм + 2 уголка АД31 10×10×1,5 (М2 к шасси), два SG90 на ушках (саморезы 2×6) через окна кронштейна, алюминиевые плечи винтами к штатной качалке (М2 по оси + 2 самореза 1,6).
- **Шарниры** — штифты Ø3 h6 (длины A 11,0, B 8,0, N 6,0, K 7,1, M 11,5, F 5,8 мм) с канавками под DIN 6799-2,3. Подшипники MR63ZZ (3×6×2,5) в Ø6 H7 бедра (A, N, K) и голени (K, M, F); тяги вращаются на штифтах в Ø3,05; штифты запрессованы в Ø3 N7 плеч, тяг и стопы. Втулки латунь Ø5/3,1: A 5,5 мм, M 6,0 мм.
- **Корпус** — «ванна» PETG 1 мм, скругление R20 в плане, разъём по x = −24: передняя часть 123 × 100 × 54, задняя 75 × 100 × 54 (стол 220 × 220 × 250). Каждая половина крепится к шасси своими винтами — клей не нужен. Окна под кронштейны ног, кормовая дверь трапа, «иллюминаторы»-вентиляция.
- **Крыша** — съёмная, PETG 1 мм, скругления R16, буртик-фиксатор и 4 магнита 4×2 (гнёзда в ободе корпуса и в крыше).
- **Отсек электроники** — лоток PETG на 4 стойках (z = 52): ESP32 DevKit и PCA9685; ниже ложемент 2 × 18350, BEC и выключатель на шасси.
- **Трап** — откидной на SG90 №13 (поворот 150°: сложен вертикально внутри, опущен под 60° до стола). Ножничная лестница прототипа при 1:40 даёт ход привода 1–2 мм и не реализуема на SG90 — заменена (см. ограничения).

Проверка столкновений (FreeCAD, булевы пересечения): сборка в позе «стоять» — 0 пересечений; нога в 6 крайних позах (u = ±6/0, z = 7/13) со штифтами и втулками — 0; трап сложен/середина/опущен — 0 (`calc/collision_check.json`).

6. ЧПУ: детали и настройки

Деталь	Назначение	t, мм	Кол-во	Габарит, мм	Отверстия
`link_AK`	бедро A-N-K	2,5	6	46×10	H7 ×3
`link_KF`	голень K-M-F	2,5	6	45×10	H7 ×3
`link_NB`	тяга N-B	2,0	6	31×7	N7 ×1, Ø3,05 ×1
`link_BM`	тяга B-M	2,0	6	19×7	Ø3,05 ×1, N7 ×1
`arm_lift`	плечо подъёма R14	2,0	6	24×12	Ø2,4 ×1, Ø1,7 ×2, N7 ×1
`arm_step`	плечо шага R13	2,0	6	23×12	Ø2,4 ×1, Ø1,7 ×2, N7 ×1
`foot_plate`	стопа (пластина)	2,0	6	8×9	N7 ×1
`bracket`	кронштейн модуля ноги	2,0	6	48×42	Ø2,2 ×6
`chassis`	шасси	2,0	1	195×96	Ø2,2 ×22

- Материал: Д16Т (2024-Т3) или АД31/6061-Т6, лист 2,0 и 2,5 мм; раскладки `dxf/nest_sheet_t2.0.dxf` (≈ 200 × 275 мм) и `dxf/nest_sheet_t2.5.dxf` (≈ 200 × 50 мм).
- **Фреза Ø2 мм** (2 зуба, твёрдый сплав, для алюминия), все внутренние радиусы ≥ 1,0 мм (заложены в геометрию: окна R1, пазы — полукруглые). Чистовой проход 0,1 мм; подача 300–500 мм/мин, 18–24 тыс. об/мин, ap 0,3–0,5 мм, СОЖ/спирт.
- **Ø6 H7 (+0,012/0)** под MR63ZZ — круговая интерполяция фрезой Ø2 с чистовым проходом либо сверло 5,8 + развёртка 6H7; Ra 1,6. **Ø3 N7** — сверло 2,9 + развёртка 3,0 (запрессовка штифта h6). **Ø3,05** — развёртка 3,0 + полировка (вращение). М2 — Ø2,2.
- Слои DXF: CUT_OUTER, CUT_INNER, H7_BEARING, PIN_PRESS, PIN_RUN, M2, HORN, TEXT. Удержание: перемычки 0,3 мм или вакуум/двусторонний скотч; снять заусенцы 0,2×45°. Опционально — анодирование (до развёртки посадочных!).
- STEP каждой детали — `step/`, плоский контур — `dxf/` (координаты от первого шарнира).

7. Печать (FDM, стол 220 × 220 × 250)

Деталь	Материал	Ориентация	Настройки
hull_tub_front / rear	PETG	открытой стороной вверх	сопло 0,4, слой 0,2, 2 периметра (стенка 1,0), 240/80 °C, без поддержек
roof	PETG	верхом на стол	слой 0,2, 2 периметра, дно 5 слоёв, без поддержек
tray, battery_holder, stair_mount	PETG	плоскостью на стол	3 периметра, заполнение 30 %
ladder	PETG	плашмя	3 периметра, 50 %
foot_shoe ×6	TPU 95A	плашмя	100 %, 25 мм/с

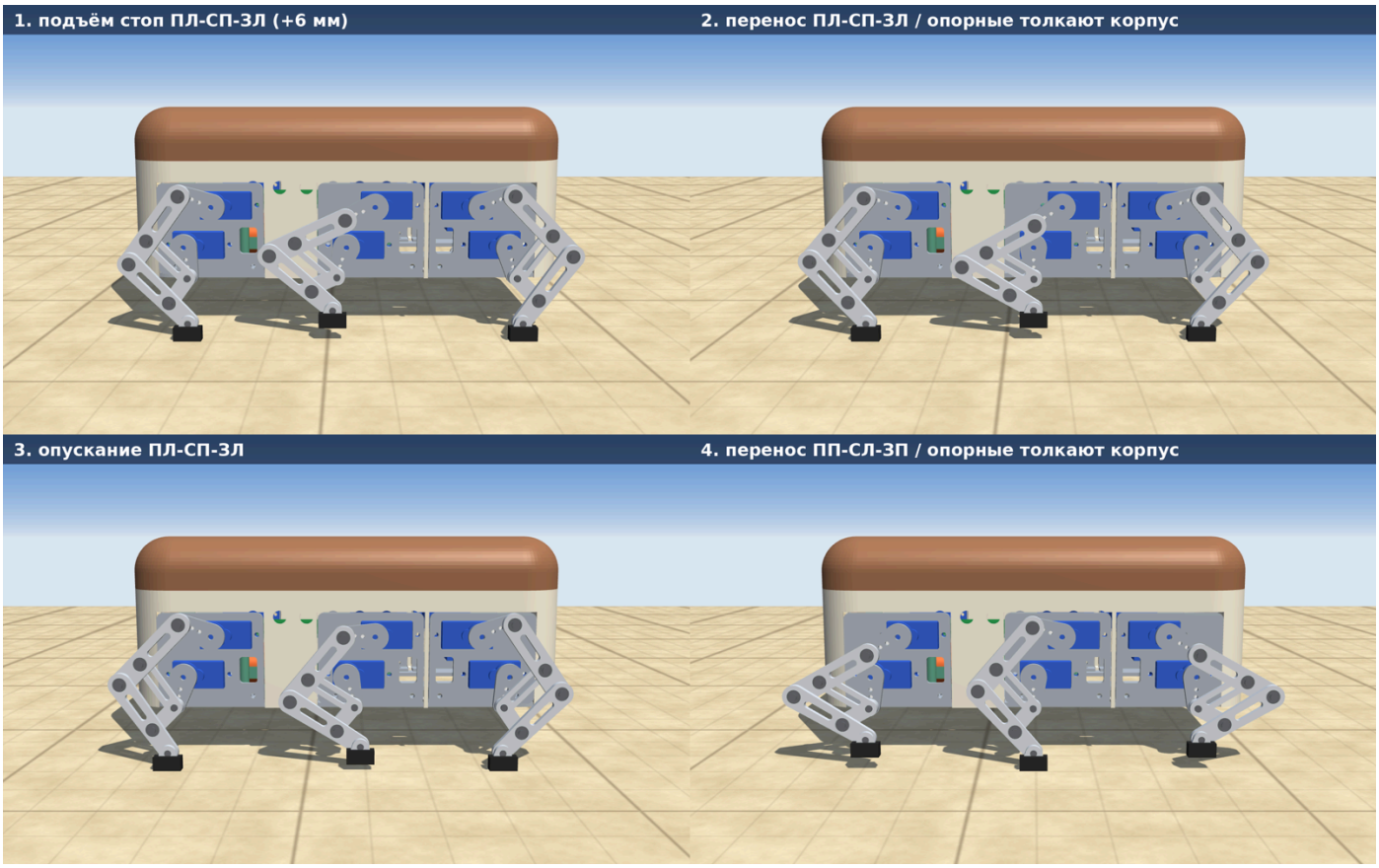
8. Сборка

1. Запрессовать подшипники MR63ZZ в бёдра и голени (оправка Ø5,9, торцом по наружному кольцу). Нарезать штифты Ø3 h6 по длинам из §5, проточить канавки 2,3 (или купить штифты ISO 2338 и подогнать).
2. Запрессовать штифты: A и B — в плечи; N — в тягу NB; M — в тягу BM; F — в стопу. Проверить качание.
3. Модуль ноги: SG90 через окна кронштейна, ушки к внутренней грани (саморезы 2×6). Уголки АД31 к кронштейну (М2×6).
4. **Калибровка до установки плеч**: прошить ESP32, открыть http://192.168.4.1/cal → «режим сборки» (все каналы 1500 мкс). Надеть качалки так, чтобы плечо подъёма смотрело горизонтально к колену, плечо шага — вертикально вниз; привинтить алюминиевые плечи.

5. Собрать пантограф: плечо подъёма → втулка 5,5 → бедро (A); тяги BM и NB на штифт B; N в бедро; голень на K; M (втулка 6,0) в голень; стопа на F; шайбы PTFE 0,5 между слоями; DIN 6799 на концы.
6. Модули на шасси (M2 через уголки). Лоток, ложемент, BEC, выключатель, кронштейн и серво трапа, трап.
7. Проводка по схеме §4.3; общая земля; конденсатор 1000 мкФ на шине V+.
8. Половины корпуса (винты M2 через фланец), магниты в обод и в крышу (полярность!), крышу на место.
9. Тонкая калибровка в /cal: смещение ±400 мкс и направление каждого канала, концы трапа; «сохранить».

9. Прошивка (`firmware/hexapod_c2`)

- ESP32 Arduino (ядро esp32 3.3.x), без внешних библиотек: свой драйвер PCA9685 (I²C 400 кГц, 50 Гц), WiFi/WebServer/Preferences из ядра. Сборка: `arduino-cli compile --fqbn esp32:esp32:esp32 hexapod_c2` — **компилируется** (≈ 976 КБ, 74 % флеш).
- Каналы: 0–5 подъём ПЛ, СЛ, ЗЛ, ПП, СП, ЗП; 6–11 шаг в том же порядке; 12 трап. Направление по умолчанию −m·sy (зеркальные модули), инверсия в калибровке.
- Походка: трипод, полуцикл подъём 20 % / перенос 60 % / опускание 20 %; у каждой ноги цель полуцикла u0 → u1 — смена команды и «стоп» плавные (за полуцикл стопы приходят в нейтраль). Повороты — разными множителями шага бортов (kL, kR), на месте — со скольжением стоп.
- Веб-пульт: вперёд / назад / влево / вправо / стоп / встать / сесть / трап, ползунок скорости 30–100 % (полуцикл 2,4…0,9 с). Страница /cal — смещения, направления, концы трапа, режим сборки, сохранение в NVS.
- Безопасность: трап только на стоянке; отсечка АКБ 6,4 В → «сесть»; мягкий старт каналов.



10. Файлы

- `cad/hx_params.py` — параметры, кинематика, размещение; `cad/hx_profiles.py` — 2D-профили деталей ЧПУ; `cad/hx_model.py` — модель FreeCAD (`freecadcmd hx_model.py`); `cad/hx_dxf.py` — DXF; `cad/hx_check_poses.py` — столкновения; `cad/hx_verify.py` — проверки.
- `cad/hx_assembly.FCStd`, `cad/hx_assembly.step` — сборка (267 тел, все Part::Feature B-rep); `step/` — 33 деталей; `dxf/` — 9 деталей + 2 раскладки; `stl/` — 8 печатных деталей.
- `calc/calc.py` → `calc/results.json`; `calc/mass.json`, `calc/cnc_profiles.json`, `calc/collision_check.json`, `calc/verify.json`.
- `bom/bom.csv`, `bom/bom.md` (+ EN) — ориентировочно **19 115 ₽**.
- `renders/` (iso, iso_front, exploded, leg_closeup, gait_phases, wiring), `renders_en/`; `anim/hx_walk*.mp4/gif`, `hx_walk_poster.jpg`; `src/` — рендер и анимация.

11. Ограничения и оговорки

- Модель спроектирована и проверена в CAD/расчёте; **физически не собиралась** — первые ноги стоит собрать и проверить на стенде (ток, нагрев SG90, люфты).
- Шаг уменьшен до 12 мм (480 мм натуры против 600 мм у C2) ради запаса момента серво шага ≥ 2; при массе < 450 г можно вернуть ±7 мм (в `hx_params.U_MAX` и `hx_kin.h`).
- Ножничная лестница заменена откидным трапом (ход ножниц при 1:40 ≈ 1–2 мм). Поворот на месте — со скольжением стоп (как у прототипа без поворотных стоп).
- Моменты SG90 сильно разнятся между партиями; люфт SG90 ≈ 1° → ≈ 0,3 мм на стопе. Металлошестерёночные MG90S — прямая замена (+4,5 г каждая, учтено не было).
- Цены ориентировочные (окт. 2026); стоимость фрезеровки зависит от мастерской.
- Посадки H7/N7 требуют развёрток; без них — клей-фиксатор для штифтов и подшипников.